

УДК 535.024:620.168:678.02:678.5.059

О.С.Колосов, д-р техн.наук, ст.наук.спів., В.І.Сівецький, канд.техн.наук, К.О.Луговська, асп.
НТУ України «Київський політехнічний інститут», м.Київ, Україна

МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ І ПЕРЕВІРКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВІТАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ПАТЕНТУВАННЯ

Описываются разработанные усовершенствованные методики расчета конструктивных параметров, а также проверки работоспособности ультразвукового кавитационного устройства, которые могут быть использованы для расчета гаммы типоразмеров и проверки работоспособности кавитационных аппаратов на базе пьезоэлектрических преобразователей для разных размеров излучающей пластины и разных технологических условий ультразвуковой обработки. Приводятся примеры патентования разработанных методик с использованием норм отечественного патентного права.

The developed improved methods of calculation computation of structural parameters, and also verifications of capacity of ultrasonic ultrasound cavity device, are described, which can be utilized use for the calculation computation of gamutlindane of types and sizes and verifications of capacity of cavity vehicles on a base baseline of piezo and electric electrical transformers for the different sizes dimension of radiative radiation-producing plate lamel and different technological terms of ultrasonic ultrasound treatment.

Examples of patenting of the worked out methodologies are done with the use of norms of native patent rights.

Вступ.

Нині одним з найбільш перспективних засобів фізичної дії на рідкі або тверді компоненти, які використовуються для інтенсифікації ряду технологічних процесів, є застосування механічних коливань ультразвукового (УЗ) діапазону, або ультразвукових коливань (УЗК).

Так, наприклад, УЗ-дія широко застосовується в медицині, хімічній, нафтопереробній, харчовій, будівельній і багатьох інших галузях промисловості для отримання суспензій і емульсій з різних речовин, диспергування, різання, зварювання, відмивання дрібних деталей від механічних забруднень, обробки твердих і крихких матеріалів, для препарування об'єктів з кристалічних, порошкоподібних, волокнистих й інших речовин при електронно-мікроскопічних дослідженнях, при виробництві композиційно-волокнистих полімерних матеріалів й у ряді інших технологічних процесів [1 – 4].

Практичне використання пружних коливань звукового і УЗ-діапазонів частот передусім пов'язане з фізичними властивостями середовища, в якому вони поширюються, і тими явищами, які виникають при поширенні цих коливань [3 – 5]. При поширенні інтенсивних УЗК в рідкому середовищі спостерігається тісно пов'язаний із звуковим тиском ефект, що зветься УЗ-кавітацією. Явище кавітації обумовлене головним чином тим, що рідини, легко «переносючи» дуже великі усебічні стискування, надзвичайно чутливі до розтягуючих зусиль. Тому при проходженні фази хвилі, створюючої розрідження в рідкому середовищі, утворюється дуже велика кількість розривів у виді найдрібніших бульбашок, що зазвичай, з'являються, в таких місцях, де міцність рідини послаблена.

Як правило, такими місцями є маленькі бульбашки газу, частки сторонніх домішок тощо. Ці маленькі порожнини (кавітаційні бульбашки), які здійснюють пульсуючі коливання, приводять до появи навколо них сильних мікротечій і локальної турбулізації середовища. Створювані бульбашки після короточасного існування закриваються під час фази стискування у хвилі, розвиваючи при цьому великі місцеві підвищення тиску, що досягають сотень атмосфер [1 – 5]. Ударні хвилі, які виникають при закритті кавітаційних бульбашок, приводять до механічних руйнувань на поверхні твердого тіла, що у ряді випадків ефективно використовується для промислових цілей.

Крім того, при закритті кавітаційних бульбашок спостерігається різке підвищення температури і виникнення електричних розрядів. Це, у свою чергу, приводить до активації рідини за рахунок появи в ній електричних зарядів, багатих на енергію дисоційованих й іонізованих молекул, а також атомів і вільних радикалів [3, 4].

Необхідна для виникнення кавітації інтенсивність УЗ залежить від частоти коливань і властивостей озвучуваної рідини. Тому при застосуванні потужних випромінювачів, використовуваних в різних технологічних процесах, необхідно контролювати рівень інтенсивності, щоби не відбувалося в середовищі таких небажаних змін, як механодеструкція, небажані хімічні реакції й тому подібне. Не слід забувати і про те, що рівень інтенсивності і частоти коливань повинні відповідати санітарним нормам і вимогам технології [5, 6].

У зв'язку з цим є доцільним аналіз наявних методик розрахунку і перевірки працездатності ефективних технічних засобів кавітаційної обробки, які генерують необхідні для конкретних технологічних процесів УЗК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Слід заздалегідь відмітити, що створення універсальних УЗ-установок і пристроїв нині практично не представляється можливим, оскільки кожен технологічний процес, пов'язаний з використанням УЗК безпосередньо в будь-яких середовищах, має ряд специфічних особливостей [5 – 6]. Ці особливості в основному визначаються різними конструктивними формами технологічних пристроїв, що перетворюють електричні коливання УЗ-частоти в механічні коливання безпосередньо в твердих або рідких середовищах.

Різноманітність конструктивних форм УЗ-технологічних пристроїв призводить до істотної відмінності їх акустичних параметрів і енергетичних характеристик. Конструкції ж УЗ-технологічних пристроїв в основному визначаються тим конкретним процесом, для здійснення якого вони призначаються [4]. Серед засобів кавітаційної обробки з плоскою випромінюючою пластиною найбільш масовими і такими, що добре себе зарекомендували у багатьох галузях промисловості, є пристрої у вигляді ванн з рідкими миючими середовищами із забезпеченням введення у них УЗК. Останні створюються за допомогою магнітострикційних перетворювачів (ПМС) або п'єзокерамічних перетворювачів пакетного типу [5 – 6].

Внаслідок малої амплітуди коливань від перетворювачів пакетного виду, що є недостатньою для протікання ряду технологічних процесів, які вимагають великої концентрації енергії на певній площі (чи об'ємі), застосовують спеціальні концентратори енергії з різними типами хвильоводів [5 – 6]. У свою чергу, при проектуванні і експлуатації коливальної системи, що складається з випромінюючої пластини з магнітострикційними або електрострикційними вібраторами, потрібне виконання ряду умов, що забезпечують резонансний режим роботи цих коливальних систем [6].

Основна проблема при проектуванні коливальних систем, що містять випромінюючу пластину, полягає в тому, що розміри цих пластин, як правило, підбирають з урахуванням вищевикладених вимог в основному експериментально. При цьому враховують, що великі розміри випромінюючої поверхні пластини призводять до того, що остання, у разі кріплення однопакетного ПМС, зазнає згинні коливання, чим обумовлює нерівномірність УЗ-поля уздовж і поперек зовнішньої (робочій) поверхні пластини.

Ця нерівномірність утруднює раціональне використання перетворювачів в автоматизованих технологічних установках, особливо при очищенні деталей, зварюванні, а також при контактній обробці тканих матеріалів значної ширини. Внаслідок цього можлива поява дефектних ділянок отриманого кінцевого матеріалу.

У зв'язку з цим нині починають знаходити широке застосування перетворювачі, магнітострикційні пакети яких розташовані в певному порядку, тобто на певній відстані один від одного, і які припаяні до загальної пластини постійного перерізу [5 – 6]. Проте складність виготовлення, трудність кріплення магнітострикційних пакетів до випромінюючої пластини і періодичної їх заміни, а також низький к.к.д. та необхідність постійного водяного охолодження в процесі роботи ПМС є основним недоліком таких ПМС [5 – 6].

Окрім цього, п'єзоелектричні перетворювачі, використовувані в УЗ-установках разом з ПМС, є, як правило, резонансними системами, що працюють на частотах основного резонансу або непарних гармонік [4 – 6]. Використовуване при роботі п'єзокерамічних перетворювачів повітряне охолодження не викликає ані додаткових втрат енергії, ані кавітаційного руйнування, як у випадку використання примусового водяного охолодження магнітострикційних пакетів.

Тому п'єзокерамічні перетворювачі, враховуючи також легкість їх виготовлення і можливість створення різноманітних конструктивних форм, знаходять усе більше застосування у промисловості для широкого спектру технологічних процесів [5 – 6].

Нерівномірність поля вигинного випромінювача може бути зменшена раціональним вибором типу випромінювача УЗ, геометричних розмірів випромінюючої пластини, наприклад її товщини, а також впорядкуванням розташування випромінювачів один відносно одного і відносно оброблюваного об'єкту (середовища).

Вищевикладене зумовлює напрями досліджень при розробці відповідних удосконалених методик розрахунку таких коливальних систем на базі плоскої випромінюючої пластини, а також методик перевірки їх працездатності.

Що стосується, власне, методик як розрахунку конструктивних параметрів, так і перевірки працездатності УЗ-кавітаційного пристрою та особливостей їх патентування, то слід зазначити, що останнє, як правило, здійснюють в рамках способів відповідно до норм патентного законодавства.

Передумовою до розроблення удосконаленої методики розрахунку конструктивних параметрів УЗ-кавітаційного пристрою є роботи [7 – 12], а уточнена методика перевірки працездатності ультразвукового кавітаційного пристрою в основному базується на результатах роботи [13].

Так, зокрема, відомий спосіб вибору геометричних розмірів випромінюючої пластини, відповідно з яким розміри цієї пластини, до якої кріплять однопакетний магнітострикційний перетворювач, вибирають експериментально [11]. Згідно з цим способом, потрібно проводити коштовні і численні експериментальні дослідження для вибору оптимальних розмірів випромінюючої пластини. У той же час великі розміри випромінюючої пластини призводять до утворення згинних коливань, наслідком яких є нерівномірність УЗ-поля уздовж і поперек наріжної поверхні пластини.

Також слід відзначити ще один спосіб вибору і розрахунку конструктивних параметрів УЗ-кавітаційного пристрою з випромінюючою пластиною, відповідно до якого як коливальну систему із випромінюючою пластиною вибирають коливальну систему на базі чотиригранного стрижня [12]. Шукану довжину чотиригранного стрижня $\ell_{\text{ст}}$ знаходять із відповідного виразу для згинних коливань $f_{\text{ст}}$ цього стрижня.

Недоліком цього способу [12] є можливість отримання лише неповних залежностей для вибору і розрахунку ефективних конструктивних параметрів випромінюючої УЗК пластини, а також відсутність уточнених розрахункових залежностей для визначення резонансних акустичних розмірів елементів коливальної системи на базі п'єзокерамічних перетворювачів і трансформаторів швидкості за резонансного режиму згинних коливань випромінюючої пластини.

У цих же роботах [11, 12] містяться описи деяких способів збирання і перевірки працездатності зібраного УЗ-кавітаційного пристрою. Відповідно до способу [11], до платини кріплять однопакетний ПМС, розміри якого вибирають експериментально, і здійснюють подальшу перевірку працездатності зібраного пристрою шляхом вимірювання амплітуди коливань уздовж і поперек пластини за резонансного режиму. Проте й тут потрібно проводити коштовні і численні експериментальні дослідження для вибору ефективних розмірів випромінюючої пластини.

Відповідно до іншого способу збирання кавітаційного пристрою з коливальною системою [12], як коливальну систему із шуканою випромінюючою пластинною вибирають коливальну систему на базі чотиригранного стрижня, яку з'єднують з випромінювачем УЗК. Далі вибирають матеріал і товщину випромінюючої пластини, а також резонансну частоту УЗК, виходячи з технологічних особливостей реалізації досліджуваного УЗ-технологічного процесу, забезпечуючи контакт випромінюючої пластини з випромінювачем УЗК.

Далі для обраної резонансної частоти УЗК визначають довжину хвилі згинних коливань випромінюючої пластини з урахуванням бажаної моди коливань або порядку частоти. Після цього здійснюють перевірку працездатності зібраного УЗ-кавітаційного пристрою, а шукану довжину чотиригранного стрижня $\ell_{\text{ст}}$ також знаходять із виразу для згинних коливань $f_{\text{ст}}$ цього стрижня.

Недоліком способу [12] є обмеженість його застосування при збиранні коливальної системи на базі п'єзокерамічних перетворювачів і трансформаторів швидкості за резонансного режиму згинних коливань випромінюючої пластини.

Вищезазначене слугувало орієнтиром при дослідженні та розробленні удосконалених і патентозахищених відповідно до норм вітчизняного патентного права методик розрахунку конструктивних параметрів [14], а також перевірки працездатності УЗ-кавітаційного пристрою [15], що описуються далі.

Постановка задачі.

В основу досліджень була поставлена задача розроблення удосконалених і патентозахищених відповідно до норм вітчизняного патентного права методик розрахунку конструктивних

параметрів, а також перевірки працездатності ультразвукового кавітаційного пристрою, що можуть бути використані для розрахунку гами типорозмірів і перевірки працездатності кавітаційних апаратів на базі п'єзоелектричних перетворювачів для різних розмірів випромінюючої пластини й різних технологічних умов ультразвукової обробки.

Матеріали і методи досліджень.

Підведення акустичної енергії до кавітаційного апарату на базі випромінюючої пластини 1 (див. рис. 1) здійснювали за допомогою випромінювачів УЗ 5, які щільно фіксували до пластини за допомогою різьбового з'єднання і зварювання.

Уздовж і поперек (див. рис. 1) випромінюючої пластини 1 регулярно розміщували декілька секцій з випромінювачами УЗ. Це давало можливість забезпечити не обідну площу випромінюючої поверхні (див. рис. 2). Резонансна частота згинних коливань випромінюючої пластини 1 і необхідна площа

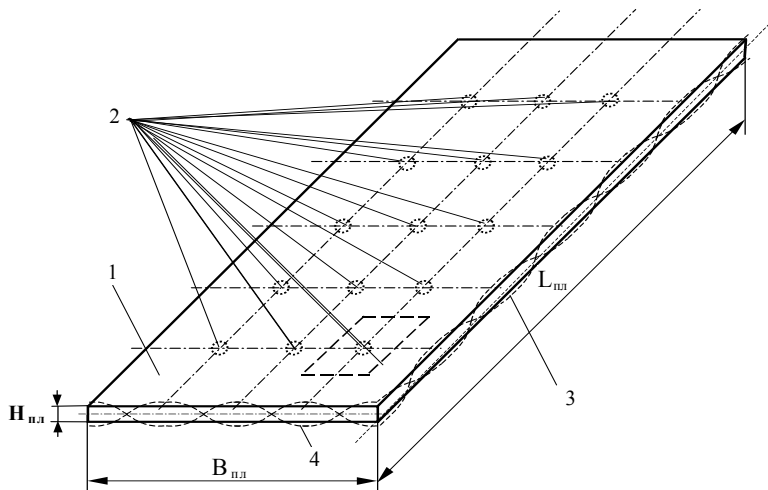


Рис. 1. Схема регулярного розміщення УЗ-вібраторів на нижній поверхні робочої випромінюючої пластини, що здійснює резонансні згинні коливання (пунктирною лінією позначені межі подібної ділянки пластины з елементами її кріплення до вібратора УЗК): 1 – випромінююча пластинка; 2 – місця кріплення УЗ-вібраторів на нижній поверхні робочої випромінюючої пластини; 3 – хвилі згинних коливань по довжині $L_{\text{пл}}$ пластини; 4 – хвилі згинних коливань по ширині $B_{\text{пл}}$ пластини

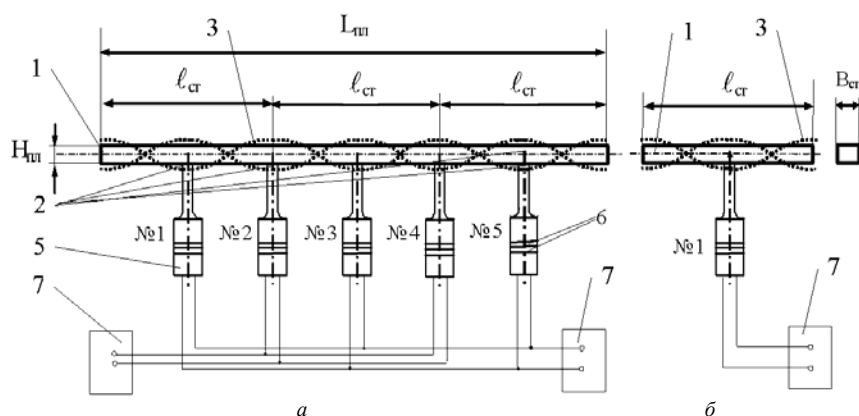


Рис. 2. Порядок розміщення й підключення УЗ-вібраторів, зібраних на п'єзоелектричних перетворювачах, на нижній частині випромінюючої пластини по її довжині (а) і на стрижні (хвильоводі) шириною $B_{\text{ст}}$, що здійснюють згинні коливання (б): 1 – випромінююча пластинка (стрижень); 2 – місця кріплення УЗ-вібраторів на нижній поверхні робочої випромінюючої пластини; 3 – хвилі згинних коливань; 5 – УЗ-вібратори (№№ 1-5), що зібрані на базі п'єзокерамічних перетворювачів 6; 7 – УЗ-генератор

випромінювання кавітатора дають можливість вибрати необхідну кількість УЗ-випромінювачів, які можна встановити на її нижній поверхні.

При цьому для досягнення максимального ефекту випромінювачі УЗ, що розміщувались поруч, підключалися протифазно, а випромінювачі, що розміщувались через один – синфазно. Оскільки випромінювачі УЗ можуть житися як від одного, так і від двох УЗ-генераторів 7, то у разі застосування одного УЗ-генератора необхідний протифазний режим роботи досягався врахуванням полярності п'єзоелементів при збиранні відповідних випромінювачів УЗ.

Задіяні в кавітаційному апараті випромінювачі УЗ були зібрані за схемою однохвильової акустичної системи (див. рис.3).

Джерелом УЗК був складений п'єзоелектричний перетворювач, зібраний з двох послідовно встановлених п'єзокілець 6, підключених паралельно до УЗ-генератора 7. Необхідне значення резонансної частоти коливань п'єзоелектричного перетворювача досягалось вибором акустичних розмірів і властивостей матеріалу демпфера 10 та трансформатора швидкості 11.

Оскільки ефективність роботи подібного кавітаційного апарату з випромінюючою пластиною визначається рівнем кавітації, який досягається при обробці робочого середовища, а сам апарат, у свою чергу, залежить від ефективності коливань випромінюючої пластини, то резонансний режим згинних коливань випромінюючої пластини є головним чинником, з яким слід узгоджувати резонансну частоту поздовжніх коливань складених п'єзоелектричних перетворювачів [6].

В якості контрольованих параметрів низькочастотних коливань УЗ-діапазону (16–24 кГц) вибирали частоту f ,

інтенсивність I і амплітуду A пружних коливань, генерованих зовнішньою поверхнею випромінюючої пластини в довкілля. Частоту пружних коливань вимірювали за допомогою частотомера ЧЗ-49, амплітуду – за допомогою віброметра, а для вимірювання інтенсивності (оцінки кількості акустичної енергії, що вводиться в середовище) застосовували наступну схему.

У калориметричну скляну посудину (з покріпленими стінками і ретельною теплоізоляцією) заливали 200 см³ дистильованої води кімнатної температури (20 °С). Потім усередину посудини з рідинним середовищем вводили концентратор УЗК і піддавали середовище УЗ-дії впродовж 5–10 хв. Початкову і кінцеву температуру усередині калориметричної посудини заміряли термометром. Шукану інтенсивність УЗ розраховували по формулі (1):

$$I = \frac{C_p V_m \gamma (T_2^0 - T_1^0)}{\tau S_K}, \quad (1)$$

де V_m – об'єм середовища (в судині Дьюара), що озвучується, м³;

C_p – питома теплоємність середовища, Дж/кг·К;

τ – час озвучування, с;

S_K – площа випромінюючої поверхні концентратора УЗ, м²;

T_1^0 і T_2^0 – відповідно початкова і кінцева

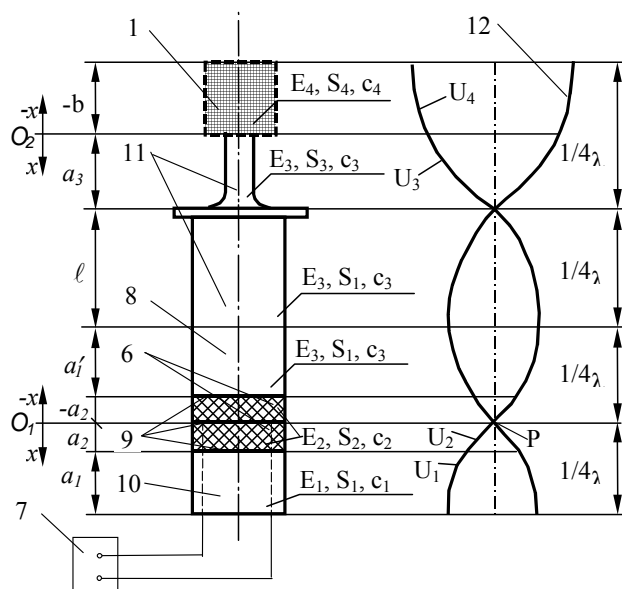


Рис. 3. Розрахункова схема однохвильового УЗ-диспергатора із симетричним п'єзоелектричним пакетним перетворювачем:
1–випромінюючий циліндр еквівалентного перетину; 6–п'єзо-керамічні перетворювачі; 7 – УЗ-генератор; 8, 10–накладки, що понижують частоту; 9–електроди товщиною (0,2–0,3) мм; 11–концентратор УЗК (трансформатор швидкості); 12–хвиля поздовжніх коливань довжиною λ

температура середовища, що озвучується, °С.

Рівномірність кавітаційного поля випромінювача оцінювали по рівномірності руйнування тонкої алюмінієвої фольги, установлені паралельно випромінюючій поверхні.

Удосконалені методики розрахунку конструктивних параметрів і перевірки працездатності ультразвукового кавітаційного пристрою та послідовність їх реалізації.

При розробці двох вищезазначених удосконалених методик УЗ-кавітаційний апарат з випромінюючою пластиною розглядався як резонансна механічна система, для якої після збирання передбачався розрахунок резонансних акустичних розмірів утворюючих її елементів. З огляду на значну складність коливальної системи, що розглядалась, зробили такі припущення:

1). взаємний вплив УЗ-перетворювачів, установлених у регулярному порядку по ширині й довжині випромінюючої пластини, є незначним;

2). зневажали взаємним впливом згинних хвиль у поздовжньому й поперечному напрямках випромінюючої пластини, тобто не враховували коливання, що були викликані гармоніками n -го порядку;

3). вплив озвучуваного середовища (рідини, сухої або просоченої тканини тощо) на коливальну систему також визнавали незначним.

Точність розрахунку складаючих конструктивних елементів відповідно до розробленої методики і, відповідно, ефективність роботи пластинчастого УЗ-кавітатора, в значній мірі залежать від якості контакту випромінювачів УЗ із внутрішньою (нижньою) поверхнею випромінюючої пластини кавітатора.

В ідеальному випадку в місці контакту повинні спостерігатися мінімальні акустичні втрати, тобто з'єднання повинно бути дуже щільним і з високоякісно виконаними контактуючими поверхнями. Крім того, площа контакту повинна бути меншого розміру в порівнянні з напівхвилею згинальної деформації.

Оскільки в УЗ-кавітаційних апаратах із площинною випромінюючою пластиною постійного перетину передбачається тільки резонансний режим роботи, що є найбільш ефективним з погляду озвучування робочого середовища (рідини або речовини), то можна не брати до уваги перехідні процеси, що відбуваються в регулярно встановлених на нижній частині випромінюючої пластини п'єзоелектричних перетворювачах.

Методику перевірки працездатності УЗ-кавітаційного пристрою, яка була запатентована [15], реалізують з використанням нижчезазначених дій наступним чином.

1.1. Як випромінювач УЗК використовують складений випромінювач УЗ у вигляді верхньої і нижньої частотопонижуючих накладок, кожна з яких виконують контактуючою через електроди з парою п'єзокерамічних перетворювачів у вигляді кілець.

1.2. Верхню накладку з'єднують з трансформатором швидкості або з концентратором УЗК, а нижню – з джерелом УЗК у вигляді генератора. При цьому контакт випромінюючої пластини з випромінювачем УЗК забезпечують за мінімальних акустичних втрат.

1.3. Здійснюють перевірку працездатності зібраного УЗ-кавітаційного пристрою шляхом оцінки рівномірності кавітаційного поля випромінюючої пластини по ширині і довжині пластини за резонансного режиму її згинних коливань.

1.4. Наступним кроком в реалізації методики перевірки працездатності УЗ-кавітаційного пристрою є розрахунок акустичних елементів складеного перетворювача, що, у свою чергу, здійснюють у відповідності до слідуєчої розробленої методики розрахунку конструктивних параметрів УЗ-кавітаційного пристрою [14].

Ця (друга) методика полягає в наступному:

2.1. Задають бажану резонансну частоту f_{ct} , характерну для конкретного технологічного процесу, і визначають інтенсивність УЗ-кавітації (наприклад, це може бути частота УЗК УЗ-генератора 7 – див. рис. 2).

2.2. Вибирають матеріал ($c_{nl} = c_4$, $E_{nl} = E_4$) і товщину H_{nl} випромінюючої пластини 1 (див. рис. 1), виходячи з конструктивно-технологічних особливостей реалізації конкретного технологічного процесу (озвучування рідких композицій, просочування чи дозованого нанесення).

2.3. Для обраної резонансної частоти УЗК f_{ct} визначають по формулі (2) довжину хвилі ℓ_{ct} згинних коливань випромінюючої пластини 1 (див. рис.1) з урахуванням бажаної моди коливань n_k (або порядку частоти λ_{ct}) [10]:

$$\ell_{cm} = \frac{\lambda_{cm}}{2} \sqrt{\frac{c_{cm} \cdot H_{cm}}{\pi \cdot \sqrt{3} \cdot f_{cm}}}, \quad (2)$$

де λ_{ct} – так званий порядок частоти, що є безрозмірною величиною, і який для випадку УЗК низькочастотного діапазону вибирається залежно від порядку коливань (моди коливань) n_k з наступного ряду [12]:

$$4,750 (n_k = 1); 7,853 (n_k = 2); 10,996 (n_k = 3); 14,137 (n_k = 4); 17,279 (n_k = 5).$$

2.4. Загальні розміри випромінюючої пластини 1, тобто її довжину L_{nl} і ширину B_{nl} вибирають кратними величині довжини хвилі ℓ_{ct} , тобто $L_{nl} = N_L \ell_{ct}$, $B_{nl} = M_B \ell_{ct}$.

При цьому на ширину пластини B_{nl} може накладатися також умова перекриття пластиною ширини тканого волокнистого наповнювача.

2.5. Залежно від отриманої кількості пучностей, що утворюються при згинних коливаннях з довжиною хвилі ℓ_{ct} , по довжині й ширині випромінюючої пластини 1, визначають кількість складених УЗ-випромінювачів, установлених по довжині (N) й ширині (M) пластини і контактуючих з нею.

При цьому максимальна кількість УЗ-випромінювачів, установлених по довжині пластини L_{nl} для одержання рівномірної інтенсивності випромінюючої поверхні дорівнює $N = 2N_L - 1$, а максимальна кількість УЗ-випромінювачів, які встановлюються по ширині випромінюючої пластини B_{nl} , дорівнює $M = 2M_B - 1$.

2.6. Розраховують масу елементів кріплення складеного УЗ-випромінювача з урахуванням приєднаної маси окремої ділянки (секції) випромінюючої пластини, тобто характеристики так званого еквівалентного циліндра [7 – 10].

2.7. Під резонансну частоту $f_{ct} = f_{nl}$ випромінюючої пластини 1 розраховують акустичні розміри елементів складеного УЗ-випромінювача (a_1 , a_3 , ℓ) за формулами (3 – 5):

$$a_1 = \frac{c_1}{\omega} \arctg \frac{E_2 S_2 c_1 ctg \frac{\omega}{c_2} a_2 + E_1 S_1 c_2 tg \frac{\omega}{c_1} a_2}{E_1 S_1 c_2 - E_2 S_2 c_1 ctg \frac{\omega}{c_2} a_2 tg \frac{\omega}{c_1} a_2} - a_2, \quad (3)$$

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \arctg \frac{E_3 S_3 c_4}{E_4 S_4 c_3 tg \frac{\omega}{c_4} b}, \quad (4)$$

$$\ell = \frac{c_3}{\omega} \frac{\pi}{2} = \frac{c_3}{4f}, \quad (5)$$

Причому вихідними даними для розрахунку акустичних розмірів УЗ-випромінювача (див. рис. 3) є геометричні розміри і фізичні параметри застосовуваного п'єзоматеріала 6 (a_2 , C_2 , E_2 , S_2), трансформатора швидкості 11 (c_3 , E_3 , S_3), частотопонижаючих накладок 8, 10 (c_1 , E_1 , S_1), а також питома акустична потужність.

Нижче наведений приклад реалізації розробленого однойменного способу [14] розрахунку конструктивних параметрів УЗ-кавітаційного пристрою з однохвильовою акустичною системою і ступінчастим трансформатором швидкості, який показаний на рис.4, відповідно до вищеописаної методики.



Рис. 4. УЗ-випромінювач з однохвильовою акустичною системою і ступінчастим трансформатором швидкості

Експериментально було знайдено, що для досягнення ефективних результатів у технології формування композиційно-волокнистих полімерних матеріалів, зокрема, при контактній УЗ-обробці як сухої тканини шириною 1120 мм, так і цієї ж тканини, але просоченої епоксидним зв'язуючим, необхідно мати такі значення технологічних параметрів кавітаційної обробки: частота УЗК $f_{y3} = f_{ct} = (18-22)$ кГц (для розрахунку прийmemo $f_{y3} = 22$ кГц); амплітуда УЗК $A = (3-5)$ мкм; інтенсивність $I = (2-4)$ Вт/см².

Як вказувалось вище, на ширину пластини $B_{пл}$ може накладатися також умова перекриття пластиною ширини тканого волокнистого наповнювача (яка у нашому випадку становить (1100-1200) мм – див. рис. 5).

Для цього використовували по дві ($K=2$) пластини з магнітострикційними (або п'єзоелектричними) перетворювачами шириною $B_{пл} = B_{ПМС} = 150$ мм і довжиною $L_{пл} = L_{ПМС} = 600$ мм кожна, розташовані поряд і з кожного боку від тканого наповнювача, тобто задовольняли умову $B_{н} \leq K \cdot L_{пл}$.

Обрана товщина випромінюючої пластини 1 становить $H_{пл} = 10$ мм = 0,01 м; матеріал — нержавіюча сталь марки 1ХН18Н9Т з такими характеристиками: швидкість звуку $c_{н4} = c_4 = 5,2 \cdot 10^3$ м/с; модуль пружності щодо розтягання $E_4 = 20,5 \cdot 10^4$ МПа.

Обчислена по формулі (2) довжина згинних коливань пластини при $\lambda_{ct} = 4,750$ ($n_k = 1$) складе: $\ell_{ct} = 50$ мм = 0,05 м. Тоді максимальна кількість перетворювачів, яку можна встановити по довжині випромінюючої пластини $L_{пл} = 600$ мм = 0,6 м, дорівнює: $N = 2N_L - 1 = 2 \cdot 12 - 1 = 23$, а максимальна кількість перетворювачів М, що можна встановити по ширині випромінюючої пластини $B_{пл} = 150$ мм = 0,15 м, дорівнює: $M = 2M_B - 1 = 2 \cdot 3 - 1 = 5$.

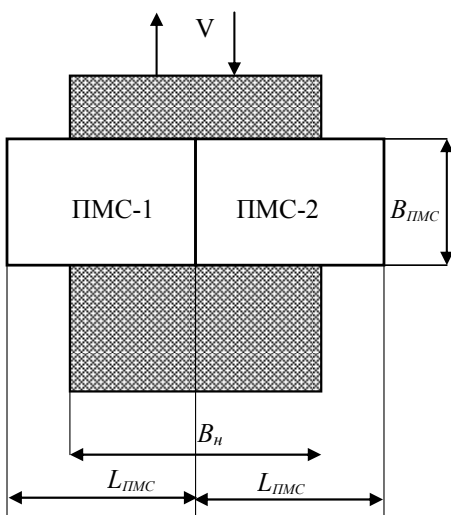


Рис. 5. Розташування двох ПМС (ПМС-1 і ПМС-2) у залежності від ширини B_n оброблюваного УЗ тканого наповнювача

Для матеріалу частотопонижаючих накладок 8 і 10 (демпферів) на основі сталі 40Х13 маємо: швидкість звуку $c_1 = 5,2 \cdot 10^3$ м/с; модуль пружності $E_1 = 2,05 \cdot 10^5$ МПа; вибраний наріжний діаметр частотопонижаючих накладок 8, 10 складає 40,2 мм = 0,042 м; їх внутрішній діаметр — 0,012 м.

Задамо конструктивно необхідне значення розміру товщини a_2 для випадку збирання на базі чотирьох п'єзокерамічних кілець 6 марки 841 зовнішнім діаметром $d_6 = 38$ мм, а саме: $a_2 = 25,6$ мм = 0,0256 м. Швидкість поширення звуку в матеріалі кільця 6 дорівнює: $c_2 = 2,5 \cdot 10^3$ м/с; модуль пружності $E_2 = 6,3 \cdot 10^4$ МПа. Питома акустична потужність для п'єзокераміки, що використовується в діапазоні (18-22) кГц, звичайно приймають рівною (1-3) Вт/см².

Значення товщини a_1 частотопонижаючих накладок 8 і 10, знайдене по формулі (3), склало $a_1 = 15,73$ мм, довжина ступені концентратора 11 меншого діаметра a_3 відповідно до формули (4), склало $a_3 = 18,7$ мм, а значення довжини ступені ℓ ділянки більшого діаметра концентратора згідно формули (5) склало $\ell = 55,91$ мм.

Рівномірність руйнування тонкої алюмінієвої фольги, установлені паралельно випромінюючій поверхні пластини 1, дала можливість припустити про рівномірність кавітаційного поля пластини. Це, у свою чергу, свідчить про задовільну працездатність досліджуваного УЗ-пристрою.

Порівняльний аналіз розрахункових параметрів, отриманих відповідно до удосконалених методик, і експериментальних параметрів, отриманих на виготовленому й впроваджену в технологічний процес кавітаційному апараті з випромінюючою пластиною, що здійснює згинні коливання, підтверджує, що погіршність вимірювань розробленого способу не перевищує 10 %, тоді як для відомих способів – понад 20%.

Таким чином, проведені дослідження дають підставу стверджувати, що результатом застосування розроблених удосконалених методик є підвищення точності розрахунку за рахунок отримання уточнених

розрахункових залежностей для вибору ефективних конструктивних параметрів випромінюючої УЗК пластини за резонансного режиму згинних коливань.

Це, у свою чергу, передбачає розрахунок резонансних акустичних розмірів елементів коливальної системи на базі випромінювача УЗК у вигляді п'єзокерамічних перетворювачів і трансформаторів швидкості. В результаті цього відпадає необхідність проведення коштовних і численних експериментальних досліджень для вибору оптимальних розмірів випромінюючої пластини, а також приводить до отримання рівномірного поля згинних коливань цієї пластини в процесі її роботи.

Розроблені удосконалена методика вибору і розрахунку конструктивних параметрів УЗ-кавітатора з випромінюючою пластиною й однойменний спосіб були перевірені при створенні декількох моделей кавітаційних апаратів для хімічної промисловості, зокрема, для регулювання дозованого нанесення епоксидного зв'язуючого у просоченій скловолокнистій тканині електроізоляційного призначення шириною 1120 мм.

З його допомогою на базі московського радіотехнічного заводу (м. Москва) та науково-технічного центру "Атол" (м. Київ) були створені експериментальні УЗ-кавітаційні апарати потужністю 2,5 кВт, призначені для УЗ-просочування електроізоляційних склотканин і наступного формування фольгованих діелектриків для Всеросійського науково-дослідного і проектно-технологічного інституту електроізоляційних матеріалів і фольгованих діелектриків (НВО "Діелектрик", м. Москва) [16].

Розроблений спосіб [14] дає можливість створювати широку гаму типорозмірів кавітаційних апаратів для різних розмірів випромінюючої пластини й різних технологічних умов. Конструкція УЗ-кавітаторів розглянутого типу дозволяє за рахунок зміни кількості секцій з випромінювачами змінювати потужність апаратів у широких межах. Експлуатація експериментальних зразків розглянутого типу УЗ-кавітаторів різних потужностей відповідно до [15] підтвердила їхню високу ефективність, надійність і легкість в обслуговуванні.

Особливості патентування розроблених методик розрахунку конструктивних параметрів і перевірки працездатності ультразвукового кавітаційного пристрою.

Очевидно, що на розроблені методики, відповідно до чинного патентного законодавства, можна отримати охоронні документи (патенти на корисну модель чи на винахід) тільки як на способи (методи), що передбачає проведення певної послідовності дій над матеріальними об'єктами за допомогою матеріальних дій.

Нижче наведений типовий приклад формули винаходу (корисної моделі), що відтворює особливості і послідовність патентування розробленої методики розрахунку конструктивних параметрів УЗ-кавітаційного пристрою відповідно до [14].

Формула винаходу (корисної моделі)

1. Спосіб розрахунку конструктивних параметрів ультразвукового кавітаційного пристрою з випромінювачем ультразвукових коливань, відповідно до якого задають бажану резонансну частоту ультразвукових коливань, характерну для конкретного технологічного процесу, і визначають інтенсивність ультразвукової кавітації на резонансній частоті, вибирають матеріал і товщину випромінюючої пластини, що контактує з випромінювачем ультразвукових коливань, виходячи з технологічних особливостей реалізації досліджуваного ультразвукового технологічного процесу, для обраної резонансної частоти ультразвукових коливань визначають довжину хвилі згинних коливань випромінюючої пластини з урахуванням бажаної моди коливань або порядку частоти, який відрізняється тим, що, здійснюють розрахунок конструктивних параметрів ультразвукового кавітаційного пристрою для випромінювача ультразвукових коливань у вигляді складеного випромінювача ультразвуку на базі послідовно з'єднаних п'єзокерамічних перетворювачів і трансформаторів швидкості, що контактують з випромінюючою пластиною із забезпеченням мінімальних акустичних втрат, розміри випромінюючої пластини вибирають кратними величині довжини хвилі згинних коливань випромінюючої пластини, визначають кількість складених випромінювачів ультразвуку залежно від отриманої кількості пучностей, що утворюються при згинних коливаннях з довжиною хвилі згинних коливань по довжині й ширині випромінюючої пластини, розраховують масу елементів кріплення складеного випромінювача ультразвуку з урахуванням приєднаної маси окремої ділянки випромінюючої пластини, після чого розраховують акустичні розміри елементів складеного випромінювача ультразвуку при резонансній частоті випромінюючої пластини.

2. Спосіб по п.1, який відрізняється тим, що, як вихідні дані для розрахунку акустичних розмірів випромінювача ультразвуку вибирають геометричні розміри і фізичні параметри застосовуваного п'єзоматеріалу, трансформатора швидкості, частотознижуючих накладок, а також питому акустичну потужність.

Типовий приклад формули винаходу (корисної моделі), що відтворює особливості патентування розробленої методики перевірки працездатності УЗ-кавітаційного пристрою відповідно до [15], наведений нижче.

Формула винаходу (корисної моделі)

1. Спосіб збирання і перевірки працездатності ультразвукового кавітаційного пристрою на базі випромінювача ультразвукових коливань і випромінюючої пластини, відповідно до якого вибирають матеріал і товщину випромінюючої пластини, а також резонансну частоту ультразвукових коливань, виходячи з технологічних особливостей реалізації досліджуваного ультразвукового технологічного процесу, забезпечують контакт випромінюючої пластини з випромінювачем ультразвукових коливань, для обраної резонансної частоти ультразвукових коливань визначають довжину хвилі згинних коливань випромінюючої пластини з урахуванням бажаної моди коливань або порядку частоти, після чого здійснюють перевірку працездатності зібраного ультразвукового кавітаційного пристрою, який відрізняється тим, що, як випромінювач ультразвукових коливань використовують складений випромінювач ультразвуку у вигляді верхньої і нижньої частотопонижуючих накладок, кожен з яких виконують контактною через електроди з парою п'єзокерамічних перетворювачів у вигляді кілець, при цьому верхню накладку з'єднують з трансформатором швидкості або з концентратором ультразвукових коливань, а нижню – з джерелом ультразвукових коливань у вигляді генератора, контакт випромінюючої пластини з випромінювачем ультразвукових коливань забезпечують за мінімальних акустичних втрат, а перевірку

працездатності зібраного ультразвукового кавітаційного пристрою здійснюють шляхом оцінки рівномірності кавітаційного поля випромінюючої пластини по ширині і довжині пластини за резонансного режиму її згинних коливань.

2. Спосіб по п.1, який відрізняється тим, що, перевірку працездатності зібраного ультразвукового кавітаційного пристрою здійснюють шляхом оцінки рівномірності руйнування тонкої алюмінієвої фольги, установленної паралельно випромінюючій поверхні пластини за кавітаційного режиму.

Можливо також отримати охоронні документи на розроблені методики й в рамках авторського права. Проте, як показує практика, найбільш доцільно отримувати комплексну охорону на розроблені удосконалені методики одночасно в рамках як патентного, так і авторського права.

Висновки.

1. Розроблені удосконалені методики розрахунку конструктивних параметрів і перевірки працездатності ультразвукового кавітаційного пристрою. Суть першої з методик розрахунку УЗ-кавитаторів з випромінюючою пластиною, яка здійснює згинні коливання, полягає у тому, що, задавши частоту коливань генератора збудження, вибравши матеріал і базові геометричні розміри накладки, що знижує частоту, п'єзокерамічної шайби, УЗ-вібратора, а також товщину випромінюючої пластини, аналітично розраховують такі акустичні розміри елементів складеного п'єзоелектричного перетворювача, як товщину накладки, що знижує частоту, довжину ступеня ділянки концентратора меншого діаметру, довжину ступеня ділянки концентратора більшого діаметру, а також визначають довжину хвилі згинних коливань випромінюючої пластини, на базі чого вибирають довжину і ширину випромінюючої пластини і кількість УЗ-випромінювачів, що кріпиться до неї на регулярній основі. Друга розроблена методика уточнює послідовність збирання і перевірки працездатності УЗ-кавітаційного пристрою на базі випромінювача УЗК і випромінюючої пластини, і включає в себе елементи першої методики.

2. Порівняльний аналіз розрахункових параметрів, отриманих відповідно до удосконаленої методики розрахунку конструктивних параметрів ультразвукового кавітаційного пристрою, і експериментальних параметрів, отриманих базі виготовленого і впровадженого в технологічний процес експериментального кавітаційного апарату з випромінюючою пластиною, що здійснює згинні коливання, показав, що погіршність розробленої методики не перевищує 10 %. Це дозволяє використовувати цю методику для створення широкої гамми типорозмірів кавітаційних апаратів з варійованими розмірами хвилеводів і габаритами випромінюючої пластини для різних технологічних процесів.

3. Наведено приклади патентування двох розроблених удосконалених методик з використанням норм вітчизняного патентного права. Зазначено, що можливо також отримати охоронні документи на зазначені розроблені методики в рамках авторського права.

Список літератури.

1. Федоткин И. М. Интенсификация технологических процессов / И. М. Федоткин. — К.: Вища школа, 1979. — 347 с.
2. Федоткин И. М. Кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть II / И. М. Федоткин, И. С. Гулий. — К.: АО "ОКО", 2000. — 898 с.
3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой. — М.: Сов. энциклопедия, 1979. — 192 с.
4. Новицкий Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Новицкий Б. Г. — М.: Химия, 1983. — 192 с.
5. Гершгал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. — М.: Энергия, 1976. — 320 с.
6. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электротехнологические установки. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 208 с.
7. Луговской А. Ф. Расчет ультразвуковых диспергаторов с составными пьезоэлектрическими преобразователями / А. Ф. Луговской // В кн.: Вестник Национального технического университета Украины (КПИ). — Сер. машиностроение. — Київ: ВПЮЛ. — Вып. 33. — 1998. — С. 291—296.
8. Луговський О. Ф. Методика розрахунку ультразвукового диспергатора з радіально-згинними коливаннями до систем підготовки паливно-повітряної суміші / Луговський О. Ф., В. І. Чорний // Вест. нац. техн. ун-та України "Київський політехн. інститут". — Сер. машиностроение. — 1999. — Вып. 34. — С. 79—87.
9. Луговський О. Ф. Методика розрахунку ультразвукового кавітаційного апарату з проточною камерою / О. Ф. Луговський // Наукові вісті НТУУ КПІ. — 2003. — №1. — С. 50—56.
10. Луговской А.Ф. Методика расчета ультразвукового кавитационного устройства с излучающей пластиной / А.Ф.Луговской, А. Е. Колосов // Экологическая безопасность. — 2005. — №1. — С. 59—67.
11. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. — М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.
12. Кумабэ Д. Вибрационное резание. — М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.
13. Колосов О. Е. Методика розрахунку параметрів пристроїв для ультразвукової обробки і інтенсифікації процесу просочення тканин наповнювачів полімерними зв'язуючими / О. Е. Колосов, В. І. Сівецький // Вісник КНУТД. — 2003. — №1. — С. 156—159.
14. Пат. на кор. мод. 57857 Україна, МПК (2009) B05C3/00. Спосіб розрахунку конструктивних параметрів ультразвукового кавітаційного пристрою / Луговська К.О., Колосов О.Е., Сівецький В.І. та ін. - №u201011422; заявл. 24.09.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. №5.
15. Пат. на кор. мод. 57856 Україна, МПК (2009) B05C3/00. Спосіб збирання і перевірки працездатності ультразвукового кавітаційного пристрою / Луговська К.О., Колосов О.Е., Сівецький В.І. та ін. - №u201011421; заявл. 24.09.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. №5.
16. Колосов О.Е. Обґрунтування процесів та обладнання для одержання виробів з композицій епоксиполімерів ультразвуковою модифікацією: автореф. дис. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології» / О.Е. Колосов. — К., 2010. — 36 с.